

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



C1-05

Comité de Estudio C1 - Desarrollo de Sistemas y Economía

FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA INTERCONEXIÓN SING (CHILE)-SADI (ARGENTINA)

F. GALLEGO *
CAMMESA
Rep. Argentina

R. MOLINA
CAMMESA
Rep. Argentina

Resumen *– Se presentan los resultados de los estudios y de las mediciones realizadas con el objeto de evaluar la factibilidad técnica de la operación interconectada entre el Sistema Argentino de Interconexión (SADI) y el Sistema Interconectado Norte Grande de Chile (SING). Se describe además la metodología adoptada para la identificación de un Modelo Global "SADI – SING", apto para estudios de transitorios electromecánicos, y el criterio aplicado para la determinación del factor de amortiguamiento relativo del modo de oscilación inter-área SADI – SING, considerando las perturbaciones frecuentes de la demanda del SING. Finalmente se destacan los desafíos técnicos a resolver para maximizar la potencia de intercambio entre ambos sistemas.*

Palabras clave: Transitorio Electromecánico – Oscilación Inter-área – Amortiguamiento Relativo – Perturbación Frecuente – Regulación de Frecuencia – Modelo Dinámico.

* Ruta 34 "S" Km. 3.5, Pérez, Santa Fe, Argentina – email: felixgallego@cammesa.com.ar

1 INTRODUCCIÓN

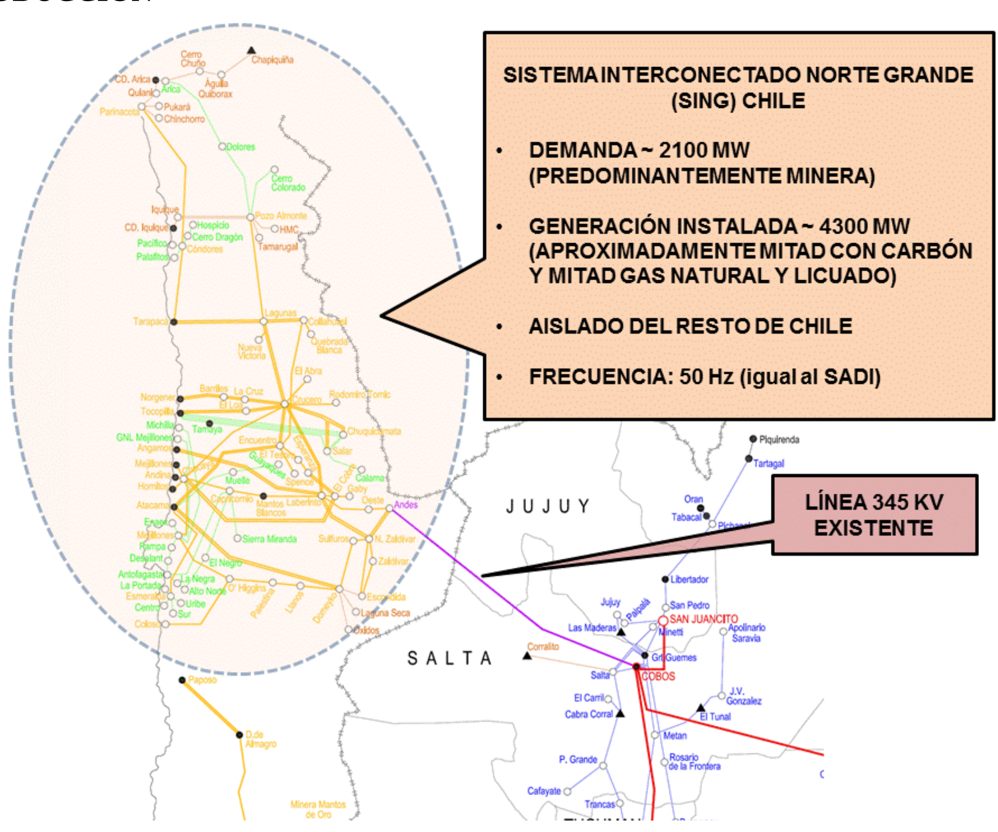


Fig. 1. LAT 345 kV Cobos (SADI) – Andes (SING)

La línea aérea de 345 kV (408 Km) que une la E.T. Cobos en el noroeste Argentino con la E.T. Los Andes, SING, (ver Fig. 1) fue construida para vincular radialmente la Central Térmica Salta de 640 MW (Argentina) con el SING, aislada del SADI. Luego de la puesta en servicio del corredor de 500 kV "NOA-NEA" y ante la ampliación de la capacidad de transformación 500/345 kV en la E.T. Cobos (ver Fig. 2), se planteó el desafío de utilizar la línea de transmisión de 345kV que se encontraba fuera de servicio desde el año 2009, para interconectar el SING con el SADI y al mismo tiempo maximizar la potencia de intercambio entre ambos sistemas.

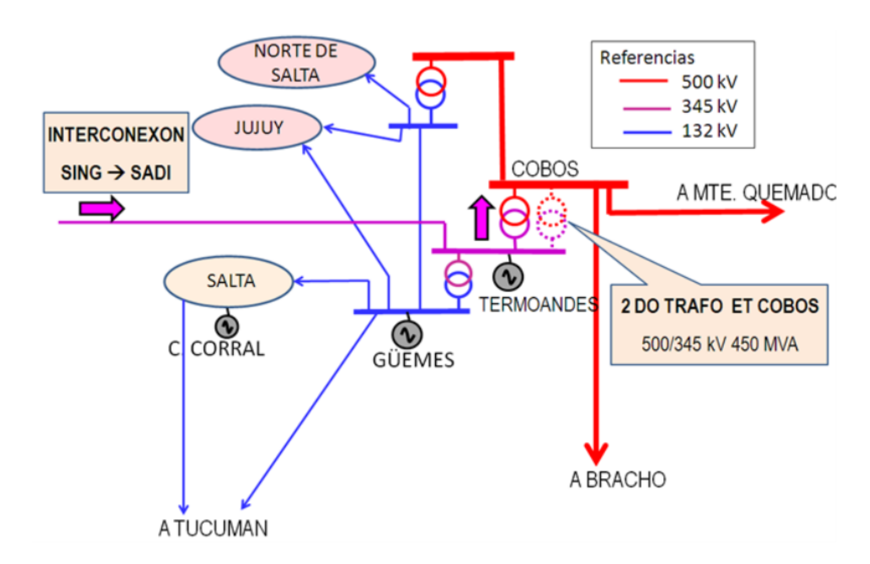


Fig. 2. Ampliación de la capacidad de transformación 500/345 kV en la E.T.Cobos

El Sistema Interconectado Norte Grande de Chile (SING) opera aislado del Sistema Interconectado Central de Chile. Tiene una demanda predominantemente minera de aproximadamente 2100 MW y una potencia instalada en generación térmica de 4300 MW. Una importante cantidad de generadores del SING carece de Modelos[1] de sus principales[2] sistemas de control verificados contra registros de ensayos. La demanda introduce frecuentes y significativas variaciones de potencia.

2 ESTABILIDAD DE LA INTERCONEXIÓN SADI - SING

Estudios[3] preliminares mostraron que la interconexión entre ambos sistemas (SING y SADI) no sería estable en estado estacionario (oscilaciones electromecánicas crecientes) con altos niveles de transporte desde Chile hacia Argentina[4] y que, para garantizar la estabilidad, sería necesario acotar el transporte a valores comprendidos entre 200 y 250 MW. Sin embargo estos resultados fueron considerados sólo una aproximación preliminar debido a la falta de datos y Modelos dinámicos precisos de numerosas unidades generadoras del SING.

La identificación de los Modelos dinámicos de los principales controles de generadores del SING, basados en ensayos de campo, se encuentra dentro de los planes de mediano plazo por parte de Chile.

Para viabilizar un intercambio de potencia estable en el corto plazo, era necesario realizar estudios complementarios en base a datos y parámetros complementarios del SING obtenidos a partir de mediciones con el objeto de identificar el modo de oscilación inter-área SADI-SING y estudiar su amortiguamiento. Estos estudios debían definir además la necesidad de recalibrar sistemas de control de generadores clave, protecciones de líneas, automatismos, etc.

3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO INTERCONECTADO

Con el fin de identificar aproximadamente un Modelo "global" del SING, se realizaron pruebas de funcionamiento interconectado con el SADI.

El domingo 02/02/2014 se realizó la primera prueba de interconexión entre el SING y el SADI. La misma se extendió durante 2hs 40min aproximadamente y consistió en transportar 50 MW hacia el SING la mitad del tiempo y posteriormente en sentido inverso. Mientras duró la interconexión entre ambos sistemas, el SING controló la potencia intercambiada y el SADI la frecuencia.

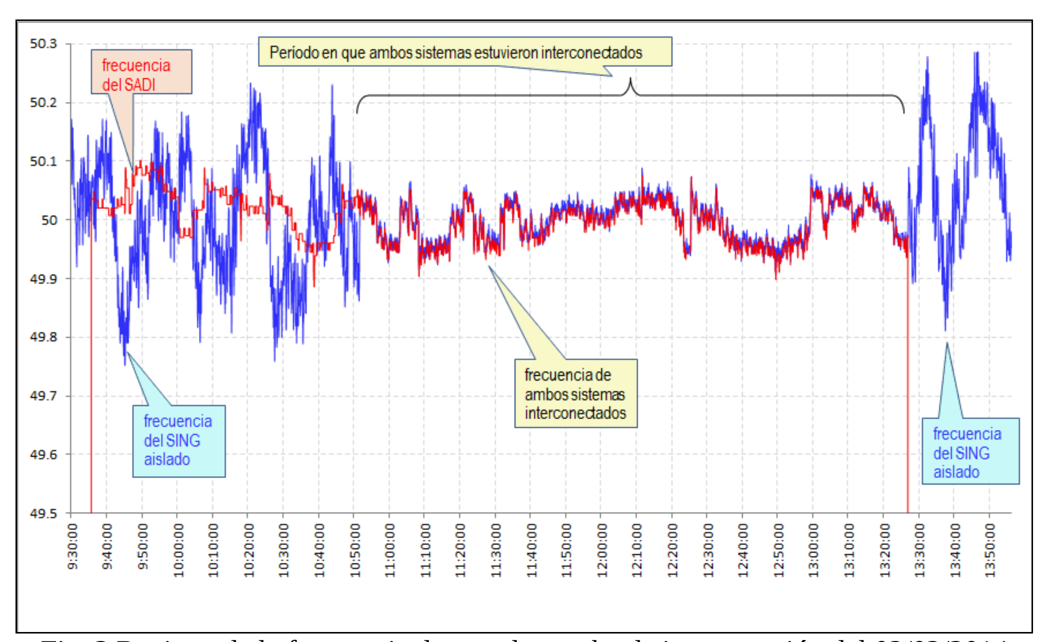


Fig. 3 Registro de la frecuencia durante la prueba de interconexión del 02/02/2014

1 Para el simulador de transitorios electromecánicos
2 AVR, GOV, PSS, etc.
3 Flujos de potencia y simulaciones de transitorios electromecánicos realizados con el PSS/E.
4 400 MW

En la Fig. 3 puede verse que previo al cierre de la interconexión la frecuencia del SING presenta oscilaciones de gran amplitud (superiores a 0,2 Hz), y también se ve cómo mejora la regulación de frecuencia del SING cuando éste opera interconectado al SADI.

3.1 Modo de oscilación inter-área SADI – SING:

Maniobra de Interconexión SADI – SING: registros de la frecuencia en la barra de 220 kV de la S/E Crucero del SING (Fig. 3); período de oscilación = 3,38 seg, amortiguamiento ≈ 4%.

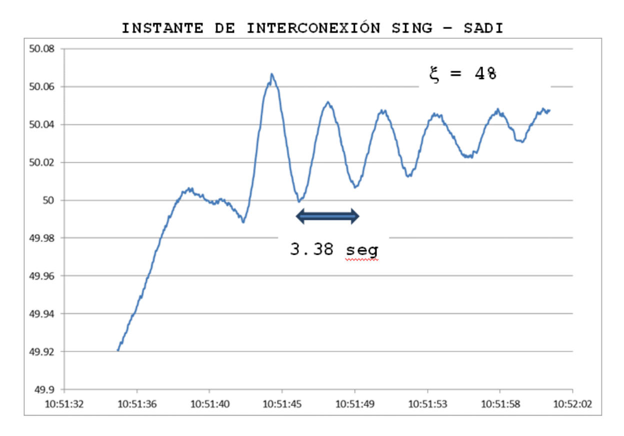


Fig. 3. Frecuencia nodo Crucero 220 kV (medida)

Fig. 4. Frecuencia nodo Crucero 220 kV (simulada)

Mediante los registros obtenidos el 02/02/2014 fue posible identificar un modo de oscilación electromecánico con una frecuencia de 0.32 Hz, <u>el cual no está presente en ninguno de los dos sistemas cuando operan aislados</u>. Dicho modo corresponde sin duda al modo inter-área SADI - SING, el cual es posible clasificarlo como tal debido a su frecuencia de oscilación y a la participación de generadores de ambos sistemas.

3.2 Influencia de la demanda del SING sobre la potencia de intercambio SING - SADI:

Para "excitar" el modo de oscilación inter-área, el 02/02/2014 se realizaron maniobras de conexión y desconexión de un reactor shunt de 120 MVAr de la E.T. Cobos (SADI). Sin embargo, las perturbaciones introducidas por la demanda del SING fueron de mayor magnitud que las provocadas por las maniobras del reactor.
La demanda del SING es muy fluctuante. Esto se debe a la operación de máquinas excavadoras de las minas, que toman una gran potencia en el momento de mayor esfuerzo mecánico y luego liberan la carga.
Los registros de la frecuencia en el nodo Crucero 220 kV cuando el SING opera aislado y en ausencia de grandes perturbaciones, mostraron desvíos superiores a 0,14 Hz cada 8 seg. Tomando este dato, mediante sucesivas simulaciones con el PSS/e, suponiendo incrementos súbitos de la carga de nodos "mineros", fue posible estimar que la demanda global del SING presenta escalones cada 8 seg de una amplitud cercana a 40 MW.

4 MODELO "GLOBAL" SING-SADI PARA PSS/e

4.1 Precisión del Modelo "global" SING-SADI para el simulador PSS/e:

El estudio se realizó empleando la base de datos y modelos de generadores del SADI, basada en ensayos de campo y verificada por el WG C2.01 Argentino de CIGRE [1]; en cambio una significativa cantidad de modelos dinámicos de generadores del SING no estaba verificada mediante ensayos de campo.
Se comprobó que la frecuencia de oscilación inter-área SING-SADI simulada (Fig. 4) presenta una buena aproximación con el valor medido (Fig. 3); este parámetro comprueba que la "inercia" global del Modelo tiene una aceptable aproximación con la realidad.
Por el contrario, si se comparan las Fig. 3 y 4 puede notarse una significativa diferencia en el valor del amortiguamiento del modo inter-área. El Modelo presenta un amortiguamiento muy superior al medido.

Conclusión preliminar: Es necesario mejorar la precisión del Modelo "global" en PSS/e ajustando datos asociados al parque de generación del SING conforme a la situación operativa vigente durante las pruebas de la interconexión, especialmente para aquellos generadores que no cuentan con Modelos verificados contra ensayos en campo, a efectos de reducir significativamente el amortiguamiento que se obtiene por simulación.

4.2 Modelo "global" SING-SADI: Ajuste del amortiguamiento:

Dado que las simulaciones mostraron un amortiguamiento del orden del 15% mientras que las mediciones reflejaron un amortiguamiento del 4% al 6% se procedió a ajustar el escenario (flujo de potencia) a la situación operativa que tuvo lugar durante las pruebas de interconexión.

En primer lugar se modeló con mayor precisión la Reserva en Giro[5] del flujo de potencia correspondiente al intercambio SING → SADI de 50 MW conforme a los datos informados por el CDEC-SING (ver Tabla 1) y sólo se dejaron en servicio los reguladores potencia-frecuencia (GOVs) de los generadores consignados como Reserva en Giro en la Tabla 1. Con esta modificación el amortiguamiento del modo inter-área se redujo significativamente aproximándose al valor medido. En segundo lugar se redujo la ganancia del Estabilizador (PSS) de la unidad generadora U16 de la Central Tocopilla (Ks1 = 5 pu → 4 pu) y se retiraron de servicio los PSS de la Centrales Norgener y Chacaya.

Con las modificaciones introducidas al Modelo del SING, el amortiguamiento del modo inter-área resultó similar al registrado. En la Fig. 5 se muestra la frecuencia de la barra Crucero de 220 kV (SING) cuando este sistema opera interconectado exportando 50 MW hacia el SADI. En este caso el amortiguamiento de las oscilaciones de 0.32 Hz resultó de, aproximadamente, un 6%.

TABLA I. DETALLE DEL DESPACHO DE GENERACIÓN DEL SING DEL DÍA 02/02/2014

BARRA	**GENERADOR**	**DESPACHO**	**P MÁXIMA**	**RESERVA GIRO ÚTIL**	**RESERVA NO RPF**	**TIPO**
19002	ANG 1 18KV 18.000	263	265		2	TV
19003	ANG2 18KV 18.000	263	265		2	TV
19038	ARICA CHAPIQ3.0000	4	10	6		DI
19044	ATACAMA TG2A15.000	101	121	20		TG
19047	ATACAMA TV2C15.000	54	61		7	TV
19097	CHACAYA CTM215.000	154	175	21		TV
19381	CTA 15.750	157	166	9		TV
19385	CTH 15.750	159	166		7	TV
19252	IQUIQUE CAVA4.1600	2	3		1	DI
19291	NORG NTO1 13.800	121	135		14	TV
19292	NORG NTO2 13.800	135	137		2	TV
19301	PAM_NORACID 13.800	27	27		0	TV
19371	TAMAYA 11 11.000	65	116		51	DI
19379	TARAPACá CTT13.800	125	158		33	TV
19405	TOCOP U12 13.800	70	81		11	TV
19406	TOCOP U13 13.800	70	84		14	TV
19409	TOCOP U16 21.000	Variable	350		Variable	TG+TV
				56 MW		

Una vez ajustado al 6% el amortiguamiento para un intercambio de 50 MW SING → SADI, se estudió el amortiguamiento del modo inter-área cuando se aumenta la exportación del SING al SADI hasta 100 MW. Las Fig. 5 y 6 permitenver que, para este escenario de mayor exportación del SING, el amortiguamiento del modo inter-área se reduce al 3%.

[5] Reserva rotante.

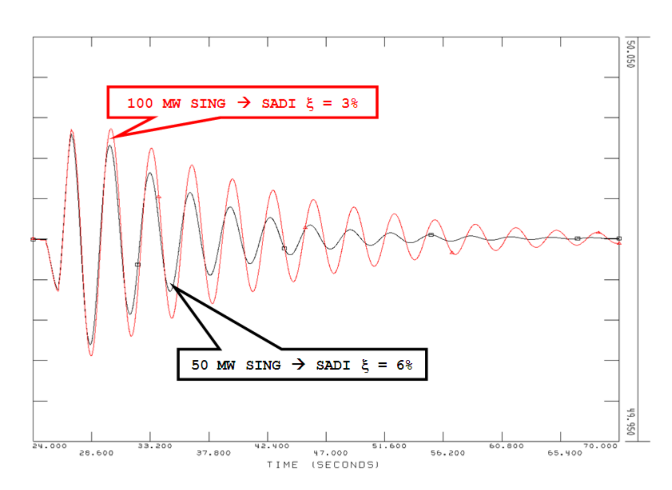


Fig. 5. Frecuencia Crucero 220 kV

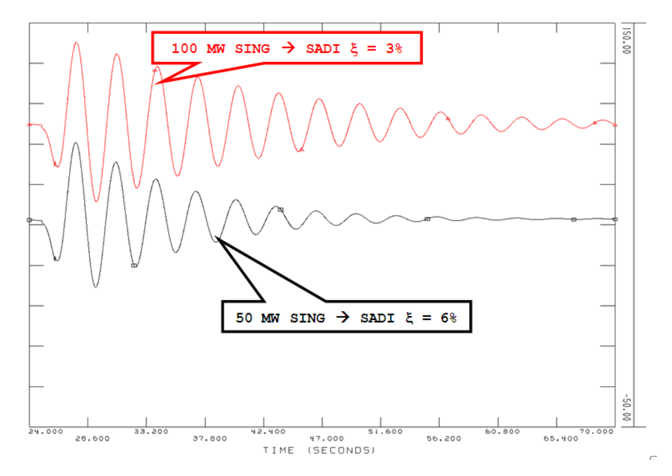


Fig. 6. Potencia por LAT 345 kV Andes → Cobos

5 MEDICIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO DEL MODO INTER-ÁREA – 11/05/14

El domingo 11 de mayo de 2014 se obtuvieron mediciones de la potencia de intercambio entre el SING y el SADI por la LAT de 345 kV Andes-Cobos para diferentes niveles de potencia, hasta un máximo de 150 MW [2]. En la Figura 7 puede verse un registro de 95 seg de la potencia activa transportada desde Andes hacia Cobos.

Es un momento oportuno para preguntarle al lector, según su propia estimación, mirando la figura 7, ¿Qué valor supone tendrá el *factor de amortiguamiento relativo* (**ξ**) del modo de oscilación visible en la interconexión?

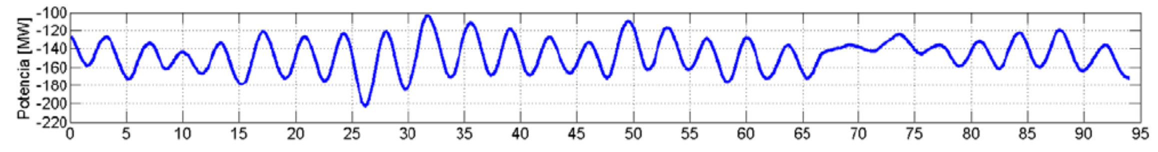


Fig. 7 : Potencia SING → SADI de aprox. 150 MW

Si se aplican métodos numéricos como el Prony o FFT a diferentes períodos de observación dentro de la ventana de registro de la Fig. 7 se obtendrán valores muy diferentes del (**ξ**) incluyendo valores negativos (inestables u oscilatorios crecientes). Sin embargo las oscilaciones no crecen en amplitud e incluso no son sostenidas. Este comportamiento sólo puede ser explicado recordando el patrón perturbador de las cargas mineras del SING, ya que cada vez que la oscilación se "reactiva" (aumenta su amplitud) se debe a una nueva perturbación (escalón de demanda del SING). Este fenómeno puede verse con mayor claridad en las Fig. 8 y 9.

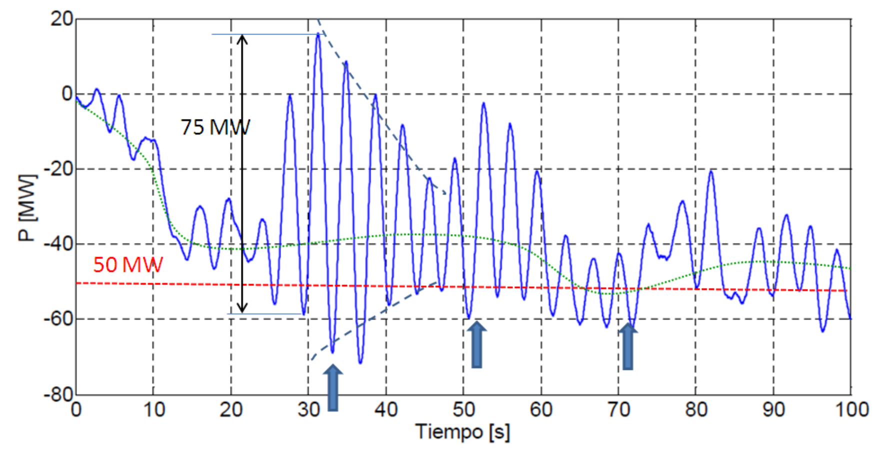


Fig. 8. Potencia en MW LAT 345 kV Andes - Cobos (11/05/14). Flujo SING → SADI: 50 MW

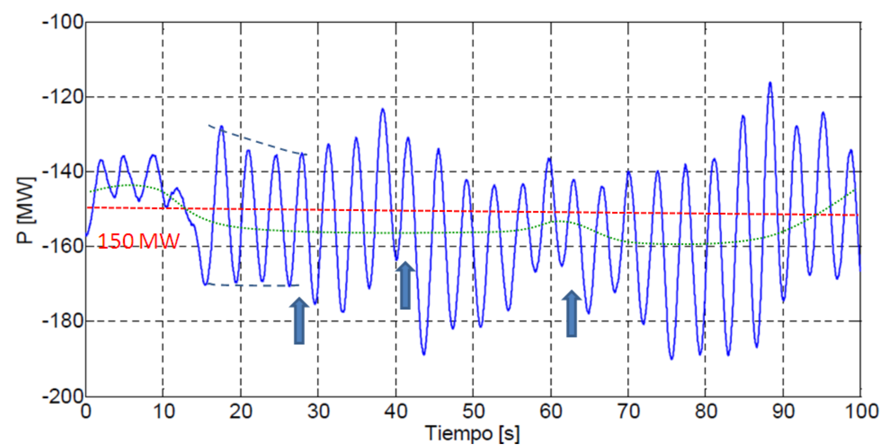


Fig. 9. Potencia en MW LAT 345 kV Andes - Cobos (11/05/14). Flujo SING → SADI: 150 MW

En las Fig. 8 y 9 se indican con “flechas” los instantes en que un apreciable escalón de la demanda del SING “reactiva” el modo de oscilación inter-área SING – SADI. En consecuencia, los tramos de registros válidos para evaluar el valor del amortiguamiento *de un escenario oscilatoriamente estable* serán aquellos en los cuales la amplitud de la oscilación de al menos 3 ciclos consecutivos se reduce. Comparando las Fig. 8 y 9 se observa que a mayor exportación desde el SING al SADI el amortiguamiento se reduce apreciablemente.

Una primera conclusión del trabajo realizado puede sintetizarse como sigue: *Para mejorar la precisión del Modelo global en PSS/e del sistema interconectado SING-SADI es necesario incluir en el Modelo del SING las cíclicas variaciones de potencia de la demanda del SING*, ya que las mismas están siempre presentes.

6 CAPACITORES SERIE DE LA S/E ANDES

Se repitió la simulación correspondiente a una potencia de intercambio SING → SADI de 100 MW, pero esta vez con los capacitores serie de ET Andes en servicio (ver Fig.10), compensando el 33 % de la reactancia de la línea Andes – Cobos 345 kV. En la Fig. 11 puede verse que los capacitores serie producen un ligero aumento de la frecuencia de oscilación del modo inter-área (de 0.31 Hz a 0.34 Hz) y el amortiguamiento aumenta del 3% al 5%.

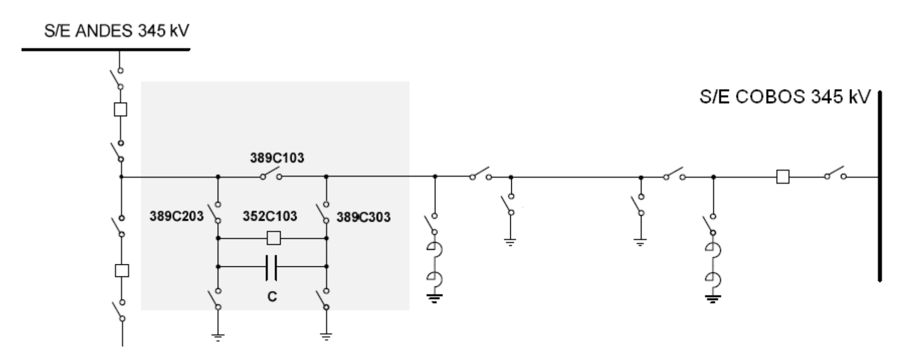


Fig.10. Esquema unifilar capacitor serie S/E Andes.

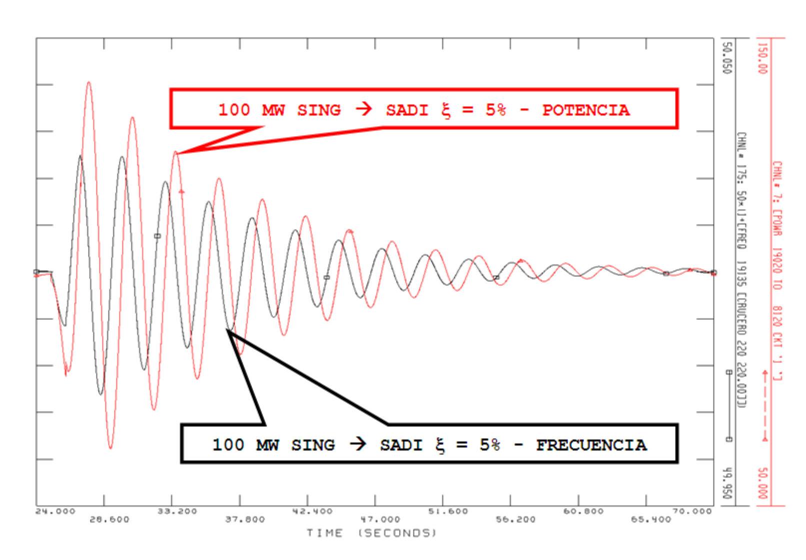


Fig.11. Frecuencia en Crucero 220 kV y Potencia en MW LAT 345 kV Andes - Cobos

7 AUMENTO DEL AMORTIGUAMIENTO DEL MODO INTER-ÁREA SADI - SING: PROPUESTA.

En base al Modelo global SING-SADI obtenido, se propone:

Etapa 1:

- ✓ Identificar 5 (cinco) generadores de mayor *"controlabilidad"* del modo inter-área SADI-SING.
- ✓ Estudiar una posible recalibración[6] de PSS, solamente de aquellos generadores del SING cuyos modelos de AVR, PSS y GOV hayan sido verificados contra registros de ensayos, tal que con ganancias razonables de los PSS pueda aumentarse el amortiguamiento del modo inter-área (0.25 a 0.35 Hz), siempre y cuando el rango de calibración de los parámetros del PSS lo permita.

Etapa 2:

- ✓ Para confirmar Modelos y parámetros, realizar ensayos (AVR, PSS y GOV) en cada uno de los generadores que, según los resultados de la Etapa 1, resulten clave para recalibrar sus PSS.
- ✓ Realizar las pruebas de campo necesarias para recalibrar y/o poner en servicio PSSs clave disponibles.

8 RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS Y MEDICIONES

- La frecuencia de la oscilación dominante: "*Modo inter-área SADI – SING"* resultó de un valor aproximado a 0.31 Hz.
- Este modo de oscilación será excitado continuamente por las variaciones de la carga del SING.
- El amortiguamiento del modo de 0.31 Hz es menor cuando la dirección del flujo de potencia es desde el SING hacia el SADI.
- En las pruebas realizadas, cuando la exportación del SING hacia el SADI alcanzó 150 MW, se midieron valores del factor de amortiguamiento relativo del modo de 0.31 Hz del 2% al4%.
- Por la interconexión de 345 kV se observaron variaciones de potencia de hasta 80 MW.
- La interconexión SADI – SING mejora significativamente la regulación de frecuencia del SING y desmejora levemente la calidad de la RPF (Regulación Primaria de Frecuencia) del SADI.
- Es factible aumentar el amortiguamiento del modo inter-área SING-SADI incorporando pocos PSS en centrales clave del SING y/o recalibrando aquellos de mayor controlabilidad.

[6] Compensación de fase y ganancia

9 CONCLUSIONES

- Las mediciones confirmaron la existencia del Modo inter-área de 0.31 Hz con lo cual se comprobó que el Modelo estático de red (impedancias) e inercias de masas rotantes presentan un buen grado de aproximación con la realidad.
- El modo de 0.31 Hz es permanentemente excitado por las variaciones de la carga del SING. No se requiere realizar maniobras programadas de equipos de la red para ponerlo en evidencia.
- El Modelo global del SADI-SING, detallado o aproximado, deberá incluir en nodos de importantes cargas Mineras del SING un "tren de pulsos" que, en conjunto, puedan alcanzar simultáneamente +/- 40 MW cada 8 seg.
- Cualquier estudio dinámico, simulación de contingencias, con el SADI interconectado al SING debe incluir el Modelo de carga perturbadora. Es necesario desarrollar un Modelo de Usuario PSS/e que pueda ser activado cada vez que se realice un estudio del SADI interconectado al SING.
- El Modelo global del SADI-SING debe representar de manera realista o levemente pesimista el amortiguamiento del modo de 0.31 Hz.
- Con mediciones SCADA de los días 22 y 23/07/14, en los que el SING devolvió al SADI 80 MW durante varias horas, es factible caracterizar estadísticamente la amplitud de las variaciones de carga del SING sobre la interconexión.
- El presente trabajo realiza aportes conceptuales sobre:
  - Oscilaciones electromecánicas inter-áreas.
  - Medición del factor de amortiguamiento relativo (ξ) en base a registros de campo.
  - Factores que afectan las mediciones de ξ (Perturbaciones de la demanda del SING).
  - Impacto de los GOV sobre el margen de estabilidad oscilatoria.
  - Impacto de la distribución de la reserva para RPF en el ξ.

10 REFERENCIAS

[1] F. Gallego, R. Molina, "Modelos de Controles de Generadores del SADI para estudios de transitorios electromecánicos", CIGRÉ, Mayo 2013, XV ERIAC, Foz de Iguazú.

[2] J. Agüero, F. Issouribehere, J. Barbero, R. Molina, "Determinación de los modos de oscilación electromecánicos en la interconexión SADI-SING a partir de registros de ensayos", CIGRÉ, Mayo 2015, XVI ERIAC, Puerto Iguazú.